

气候环境变化研究中影响粘土矿物形成及其丰度因素的讨论

孙庆峰¹, Christophe Colin², 陈发虎³, 张家武³

(1. 西北师范大学 地理系, 甘肃 兰州 730070; 2. Laboratoire des Interactions et Dynamique des Environnements de Surface (IDES), UMR 8148, CNRS-Université de Paris-Sud, Bâtiment 504, 91405 Orsay Cedex, France; 3. 兰州大学 西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 粘土矿物在形成过程中受构造运动、气候、盆地规模、地表母岩、土壤、植被、地貌、介质环境、风以及成岩作用等多种因素的影响, 这些因素对地层中粘土矿物的类型和含量的影响程度不一。构造运动和气候是影响粘土矿物形成的两个主要因素, 对沉积物中的粘土矿物形成和含量以及影响粘土矿物形成的其他次要影响因素有着控制作用。在构造活动稳定的状态下, 气候则成为影响粘土矿物形成和含量的决定性因素, 其他因素尽管也有不同程度的影响, 但可以看成是相对稳定不变的。粘土矿物携带的主要是气候环境变化的信息。地表水系的复杂程度引起的沉积物的混合程度影响粘土矿物信号的清晰度, 沉积埋藏成岩作用对粘土矿物的影响也不容忽视。

关键词: 气候环境变化 粘土矿物 形成因素 丰度

中图分类号: P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0291-10

A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental researches

SUN Qing-feng¹, COLIN Christophe², CHEN Fa-hu³ and ZHANG Jia-wu³

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Laboratoire des Interactions et Dynamique des Environnements de Surface (IDES), UMR 8148, CNRS-Université de Paris-Sud, Bâtiment 504, 91405 Orsay Cedex, France; 3. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental System, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Clay minerals have such main types as illite, chlorite, smectite and kaolinite. They could record rich information of climatic and environmental changes during their formation and hence are good proxies in climatic and environmental study. Many factors such as tectonic movement, climate, basin size, surface parent rocks, soils, vegetative cover, landscape, water media properties, wind and diagenesis, affect the clay mineral formation. The types and quantity of clay minerals in strata depend on these factors in varying degrees. Tectonic movement and climate are two primary factors which dominate the types and quantity and control other secondary factors which influence clay mineral formation. It is very difficult and unsuitable to analyze climatic and environmental changes during the tectonic movement phase only by clay minerals. For a long geological time which has tectonic movement, sedimentary facies and palaeogeography must be used to decipher paleogeography and plaeo-environment information. However, under stable tectonic movement, which spans usually a short geological time, other information factors keep stable and clay minerals are formed mainly through climatic factors.

收稿日期: 2010-05-19; 修订日期: 2010-08-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41061022)

作者简介: 孙庆峰(1964-), 男, 副教授, 博士, 矿物岩石、第四纪地质专业, E-mail: sqf@nwnu.edu.cn

They record the real information of climate and environment changes and hence can be used as climatic proxies. Basin change of climate and environment could be inverted. So, climate is the key factor for forming clay minerals and determining their amounts. Strata-tectonic analysis must be done when clay minerals are used to decipher climatic and environmental information. In a word, when tectonic movement is stable, climate becomes the dominate factor affecting clay mineral formation. The other secondary factors keep invariant and clay minerals carry the major climatic information, and they can be used to decipher climatic and environmental history. The mixture of clay minerals caused by ground hydrographic systems affects the signal clearness of clay minerals carrying major climatic information and environments. Sedimentary-buried diagenesis of clay minerals in strata shouldn't be ignored in analysis.

Key words: climatic-environmental changes; clay minerals; formation factors; abundance

粘土矿物在表生环境形成过程中受到地质构造运动、盆地规模及区域气候带、地表母岩、气候、土壤、植被、地貌、介质环境、风以及成岩作用等多种因素的影响。粘土矿物携带了丰富的气候环境变化信息,它不仅能应用于较长的地质时段内岩相古地理和古环境的研究(如 Dera *et al.*, 2009; Franke & Ehrmann, 2010),而且随着近期高分辨率地层学的发展,尤其是碳同位素测年的应用,粘土矿物也正不断地被应用于末次冰期以来(如 Oliva *et al.*, 2003; Tamburini *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2004; Gingele *et al.*, 2007)以及全新世(如 Lamy *et al.*, 2001; Egli *et al.*, 2001; Gingele *et al.*, 2002, 2004, 2007; Thamban *et al.*, 2002; Pai *et al.*, 2007; Ehrmann *et al.*, 2007; Fagel & Boës, 2008)短尺度气候环境变化的研究中。粘土矿物与碳氧同位素、孢粉、树轮、冰芯等一样得到了广泛的应用,成为重要的反映气候环境变化的代用指标。尽管已有不少的文献对粘土矿物在古环境和古气候方面的研究进行了总结(Singer, 1984; Chamley, 1989; 徐昶, 1990, 1993; 鲁春霞, 1997; Thiry, 2000; 陈忠等, 2000; 蓝先洪, 2001; 汤艳杰等, 2002; 陈涛等, 2003, 2005; 隆浩等, 2007),但对影响粘土矿物形成和丰度的因素的研究还不够系统、深入和全面。本文拟对影响粘土矿物形成及其含量的因素进行讨论,以期全面理解粘土矿物形成过程中各因素的影响,正确应用粘土矿物代用指标,诠释其指示的气候环境变化信息。

1 粘土矿物的类型和气候意义

粘土矿物主要是地表母岩在表生环境下经过风化形成的、颗粒小于 $2 \mu\text{m}$ 、具有层状结构的含水硅酸盐矿物。最常见的粘土矿物是片状的伊利石、绿泥

石、蒙脱石和高岭石以及纤维状的坡缕石、海泡石。

伊利石和绿泥石是在气温低、淋滤作用不强的弱碱性介质环境中形成的(Meunier, 1980),它们反映的是干冷的气候条件(Vanderaverroet, 2000; Winkler *et al.*, 2002; Gingele *et al.*, 2007)。

蒙脱石大部分形成在弱碱性介质环境中,在温带半湿润区沉积物中含量比较高。蒙脱石的出现主要反映形成时的水分状况,可以不依赖于特定的气候条件(Chamley, 1989)。在半干旱地区随着季节性降雨的作用,新生作用使蒙脱石具有较高的结晶度,能够指示暂时的干旱环境(Singer, 1984; Chamley, 1989);而形成于湿润-温暖气候条件下的蒙脱石的结晶度较低(Chamley, 1989)。蒙脱石的含量可以作为区域降雨量的代用指标(Robert, 2004)。

高岭石形成在酸性介质环境中,为风化程度很高的矿物,主要出现在低纬度温暖潮湿的区域,反映湿热气候。高岭石在湿热的风化条件下可转化成铝土矿(Chamley, 1989)。

坡缕石和海泡石形成于强碱性介质环境,与高度可溶 Mg^{2+} 的活性有关(Tateo *et al.*, 2000; Khadkikar *et al.*, 2000),它们是干旱、半干旱环境的良好指示剂(Singer, 1979)。

2 影响粘土矿物形成和丰度因素的讨论

2.1 地质构造运动

构造运动是影响粘土矿物形成的两个主要因素之一(Pay *et al.*, 2000; Egger *et al.*, 2002)。在较长的地质历史阶段里,大地构造旋回(或褶皱旋回)以及由多个褶皱幕组成的一个旋回往往使地层变形,岩浆活动强烈,变质作用加强,形成大型山系和盆地。盆地沉积物中粘土矿物的形成不仅受到盆地

所处的行星气候带变化的影响,而且受到由构造引起的盆地其他因素如地貌、出露的地层、植被、水系、盆地基地活动程度(补偿沉积、非补偿沉积、超补偿沉积)以及沉积岩间断和不整合接触等多方面的影响。这些因素在构造前后发生明显和剧烈变化,它们和气候同时影响粘土矿物的形成(Fagel *et al.*, 1994; Devleeschouwer *et al.*, 2002; 张立强等, 2005; West *et al.*, 2005)。在用粘土矿物进行气候环境分析时,除气候以外,这些因素的相互影响使得粘土矿物的形成过程变得极其复杂,气候影响下形成的粘土矿物和其他因素形成的粘土矿物高度混合或叠加,很难辨别出是气候因素还是其他因素在影响粘土矿物的形成,而且各因素的影响程度也很难确定。所以,在具有构造活动的时段仅根据粘土矿物来分析气候环境变化是困难的、不恰当的。对于较长的、具有构造活动的地质历史阶段则主要是利用岩相古地理的方法来恢复历史时期的古地理和古环境(Egger *et al.*, 2002; Limkevicius *et al.*, 2002; Madhavaraju *et al.*, 2002; Deconinck *et al.*, 2005; Mees *et al.*, 2007; 胡作维等, 2008; 曹珂等, 2008; 罗忠等, 2008)。

在相对较短的地质历史时期,如在一个构造旋回或褶皱幕以下的范围内,或比它们更小的地层时段内,地质构造活动相对稳定,从而使除气候之外的其他因素保持稳定,粘土矿物的形成主要受气候的影响,粘土矿物记录的才是气候环境变化的主要信息,粘土矿物才可以作为反映气候环境变化的指标,可以反演盆地气候环境变化的历史(Robert & Kennett, 1997; Vanderaveroet, 2000; Gingele *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2003; 师育新等, 2005; 李祥辉等, 2008; 万世明等, 2008)。

在运用粘土矿物进行气候环境变化分析时必须进行地层构造活动分析。无明显地质构造活动、连续、无间断、时代明确的沉积地层才适合进行以粘土矿物为代用指标的气候环境变化的分析。

2.2 盆地规模与区域气候带

在地壳稳定、没有发生明显地质构造运动的情况下,盆地规模及其与气候带的展布走向对盆地汇集的粘土矿物信号的解析也具有重要的影响。

粘土矿物在风化和汇集过程中受到盆地流域范围内诸多因素的综合影响。如果盆地规模大,尤其像海洋盆地和内陆大型盆地,碎屑物质物源广泛,沉积物混合度大,环境变化差异较大,搬运距离长,过

程复杂,粘土记录的信号就不够清晰(Thiry, 2000; West *et al.*, 2005);反之,亦然。以尼罗河-地中海盆地为例,尼罗河口粘土矿物的气候信息很不明显。尼罗河在非洲自南向北流入地中海,穿越非洲热带和北温带两个气候带,上、中游受热带气候的影响,上游地表为高岭石、铝矾土土壤,中游为蒙脱石变性土土壤,下游受温带气候的影响,为坡缕石和蒙脱石的钙质土壤。尼罗河水系汇集这些地表的粘土矿物最终在地中海沉积时发生了高度混合,很难解析粘土矿物携带的气候环境变化信息(Thiry, 2000)。与尼罗河-地中海盆地不同,亚马逊河走向东西,和赤道热带平行,亚马逊流域全部在热带地区,影响粘土矿物形成的主要气候背景条件相同,亚马逊盆地的沉积物和其中的粘土矿物可以反映流域的气候环境变化,粘土矿物可以作为气候环境变化的代用指标(Martinelli *et al.*, 1993; Dosseto *et al.*, 2006)。

对于内陆大型湖盆,如果区域气候带分异小,其中的粘土矿物则可以较好地指示气候环境变化。如贝加尔湖,其为亚洲内陆高原大型湖泊,湖泊地处北温带,走向长600多千米,宽近100 km,只有色楞格河在湖泊南部注入,湖泊尽管规模很大,但区域气候分异小,水系单一,粘土矿物来自相对较小的汇水区域,湖泊第四纪时期粘土矿物研究表明,粘土矿物可以很好地反映区域气候环境变化(Fagel *et al.*, 2003; Fagel & Boës, 2008; Fagel & Mackay, 2008)。

对于规模较小的盆地,地表气候带分异也较小,粘土矿物指示气候环境变化的代表性很好。如在美国加利福尼亚太平洋沿岸 Santa Barbara 盆地,粘土矿物可作为良好的气候代用指标。海盆走向长100多千米,海盆沿岸水系单一,山区地表径流携带的粘土矿物来自于陆地沿岸的落基山脉,海盆晚第四纪以来粘土矿物中的蒙脱石的含量可以作为雨量的代用指标,森林的发育与雨量有较好的对应性,并且与全球气候变化具有可比性(Robert *et al.*, 2004)。

可见,盆地规模及其与区域气候带的关系对粘土矿物形成和含量变化具有重要影响。

2.3 母岩

地表出露的三大类岩石(火成岩、变质岩和沉积岩)在盆地流域内出露的类型和面积影响盆地粘土矿物的类型和含量。

以岩浆岩(火山岩)为例,以下几个方面影响风化过程中粘土矿物的形成:①岩石中原生矿物的风化能力。不同亚类的岩石因矿物成分的差异在风化

过程中相应形成的粘土矿物也有一定的差别。岩浆岩中矿物的风化能力与鲍温的矿物结晶序列和顾其迪的实验一致,即各种主要原生矿物的分解难易程度有一定的顺序(黄瑞农,1987;路景冈,1997)。在最高温和最干条件下形成的矿物较从较低温含有更多水的岩浆岩结晶出的矿物更易风化,即矿物的结晶条件更接近地表的现在条件,则稳定性逾高。②矿物的结晶构造。如斜长石的构造与正长石相似,但因内部离子构造差异,正长石中的 K^+ 容易被其他离子置换失去,较斜长石更易风化。其他基性矿物所含的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 等离子很容易被 H^+ 破坏,比长石更易风化。而石英为架状构造,电性中和,是最为稳定的矿物。在外界风化环境相似的情况下,原生矿物风化的能力顺序如下:橄榄石>辉石>角闪石>黑云母>滑石>蛇纹石>绿帘石>基性斜长石>酸性斜长石>正长石>白云母>石英(黄瑞农,1987;路景冈,1997)。③岩石的结构。如火山玻璃质的凝灰岩、安山岩-玄武岩、流纹岩等风化后最易形成蒙脱石,这是由于玻璃质岩石透水性差,碱性离子难以带出,介质环境呈中性或碱性(刘宝珺,1979;Chamly,1989)。结晶度较好的蒙脱石多形成于温热气候条件下的火山岩中(Chamly,1989)。在岩浆岩(火山岩)中粘土矿物的形成有4个阶段(Chamly,1989):①非晶-亚晶质粘土矿物形成(如水铝石英等);②广泛的Fe-Al族蒙脱石形成(绿脱石、蒙脱石等);③多水高岭石增加;④高岭石化程度增加,伴随铝土矿形成,土壤层形成。总的来说,岩浆岩(火成岩)的化学成分和水/岩比是决定形成粘土矿物类型的主要因素,如在酸性和基性火山岩表层土壤层中的粘土矿物,在降雨量低于1000mm时,蒙脱石和伊利石含量较高,高岭石、蛭石和铝土矿含量低;在降雨量大于1000mm时,蒙脱石和伊利石含量较低,高岭石、蛭石和铝土矿含量变高(Galán,2006);同时,温度和时间影响其化学过程的速率(Velde,1992;Foley,1999)。

三大类岩石的形成环境和矿物组成不同,风化过程中贡献的粘土矿物也不同。火成岩和变质岩形成于地下高温、高压环境,沉积岩形成于地表温度、压力相对较低的环境。火成岩的主要组成矿物是石英、长石、角闪石、云母、橄榄石等;沉积岩的矿物成分主要是石英、白云母、长石、粘土矿物、碳酸盐矿物、铁质矿物以及石膏、有机质和磷酸盐矿物等;变质岩的成分最为复杂,除了具有岩浆岩和沉积岩中

的大多数矿物之外,还有一些特有的变质矿物,如红柱石、蓝晶石、阳起石、透闪石、叶腊石、蛇纹石、硅灰石等等。在不考虑岩石结构、构造及其他地表出露条件差异的情况下,如果气候环境相同,火成岩和变质岩易形成自生粘土矿物,沉积岩次之。必须注意的是,沉积岩中多具有原来的碎屑粘土矿物,它们的总量是多次气候环境变化所形成。不同类型岩石中的矿物转化成粘土矿物具有一般的顺序(图1,路景冈,1997)。可见,不同岩石类型及其所含不同的原矿物的类型和多少影响沉积物中风化粘土矿物形成的类型及其含量。

但关于三大类岩石的不同中岩石类型以及不同的矿物在同一气候环境条件下形成粘土矿物的差异性目前在国际上尚未有这方面的研究。

岩石在盆地流域内出露的面积大小也影响粘土矿物在盆地中汇集的丰度。出露面积大者,相应形成的粘土矿物多,反之亦然。

2.4 气候

气候是影响粘土矿物形成的另一个主要因素(Pay *et al.*,2000)。在地壳稳定的情况下,粘土矿物是在确定气候条件下的综合沉积记录,而其他有关方法手段获得的古气候信息则更可能反映的是局部的和瞬时的(Thiry,2000)。构成气候的两个基本要素是温度和湿度。在潮湿温暖的气候条件下,淋滤作用较强,母岩风化时,一些碱金属、碱土金属元素容易被淋滤流失,先形成蒙脱石,进一步形成高岭石。高岭石与铝土矿在世界各地的分布与气候带的分布具有一定的一致性,它们主要分布在热带地区,那里地表岩石和土壤仍在进行高岭土化作用,湿热气候可以使高岭土进一步转化成铝土矿(Thiry,2000)。而干冷气候条件下,淋滤作用较弱,不利于碱土金属元素发生淋滤作用,有利于伊利石、蒙脱石(陆源碎屑成因)伊利石/蒙脱石混层类粘土矿物和绿泥石的形成。

在整个地史时期,由于古气候不断地进行交替变化,粘土矿物的组合特征也随之发生相应的变化,粘土矿物的变化与古气候的变化有客观的关系。温度和湿度的差异使地球表面形成不同的气候带,各气候带内风化作用的类型和程度明显不同,相应地形成了不同的风化复合体和土壤类型,其中的粘土矿物组合也具有一定的特征(Thiry,2000)。现在地球表面沉积物和土壤中粘土矿物的分布与气候带的分布具有很好的吻合性,显示出气候带在同一母岩

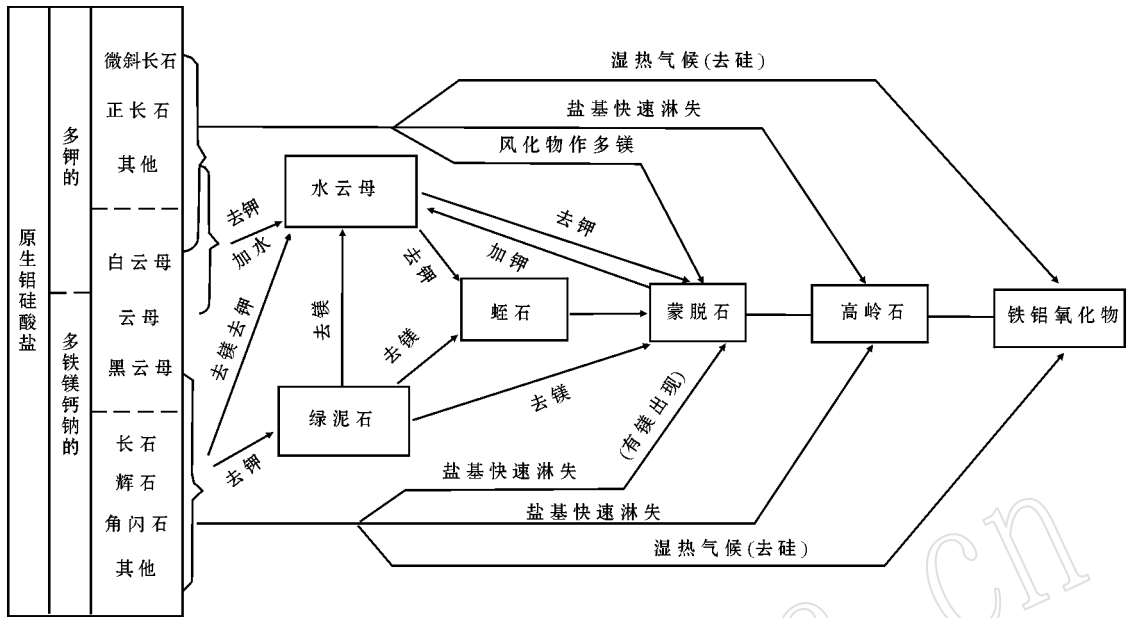


图 1 原岩中矿物风化形成粘土矿物的一般顺序(路景冈,1997)

Fig. 1 General sequence of clay mineral formation through weathering in parent rocks(after Lu Jinggang ,1997)

背景下对粘土矿物形成和分布的控制作用(Thiry, 2000)。气候是影响粘土矿物形成的主要和决定性因素(Biscaye, 1965)。

2.5 土壤

出露于盆地流域内的基岩在气候影响下形成风化壳,随着风化作用的持续,发育了层次分明的风化壳剖面。粘土矿物在风化壳中得以形成和富集。风化壳最上部的风化层在植物形成的有机质和微生物的参与和作用下形成土壤层,其中粘土矿物最为丰富。地表土壤受母岩、生物、气候、地形、时间等多种因素的影响,但其中气候是决定性的和主要的影响因素。气候决定着全球土壤的地带性(纬度分布、区域纬度分布、垂直气候带分布)分布,影响土壤的风化和淋溶过程、土壤有机质的积累和分解,同时也决定着与之对应的规律的全球植物的区域分布(吴成基,2008)。

土壤形成过程中成土作用产物的残积粘化作用的发生极为广泛。在残余风化壳中,淋滤层和淀积层中形成的粘土矿物是土壤粘化的最普遍的形式之一。此外,运动的潜水流与地表水流蒸发和蒸腾时形成的水成(水堆积)粘化作用也可形成新生的粘土矿物,一般有两种情况:一是在毛管薄膜水中由不同比例的二氧化硅和倍半氧化物的化合物直接合成粘土;二是二氧化硅溶液使沉淀的铝或铁的氧化物复硅形成粘土矿物(黄瑞农,1987)。土壤中的这些新

生粘土矿物记录了形成过程中的气候环境信息。

风化作用形成的土壤层可残留原地覆盖基岩,使得基岩的风化速度和程度减弱,或者经剥蚀、搬运堆积到坡面和低洼处,或者经流水、风、冰等介质把形成的粘土矿物运移到盆地中沉积。对于盆地沉积的某一时段的一段沉积层中而言,其中的粘土矿物往往是基岩风化形成的新粘土矿物、前期基岩表层土壤粘土矿物(残积土壤)、前期坡积层粘土矿物共同搬运到盆地沉积的混合物。真正携带地表气候的粘土矿物是基岩风化形成的粘土矿物,而残积土壤和坡积层中的粘土矿物是二次风化、剥蚀、搬运形成,携带了二次风化阶段的气候环境信息(路景冈,1997),所以,盆地沉积层中测得的粘土矿物实际是两次气候环境变化叠加而形成的粘土矿物,它们叠加的程度与气候变化、地形的陡峭程度、地表植被的发育、地表的粗糙度、表层土壤面积有关。一般来说,除气候以外的其他因素稳定时,土壤的粘粒矿物类型与母岩类型及年平均雨量、温度有密切关系。温度高、雨量大、形成区域湿度大、化学反应、植被发育(腐殖质、酸性介质易于形成)、水介质成酸性,有利于高岭石、蒙脱石和铝土矿矿物发育形成;反之,有利于绿泥石、伊利石等粘土矿物的形成(路景冈,1997)。

2.6 植被

植被和土壤的发育一致,是气候直接作用的结

果。风化过程和土壤的形成过程紧密联系,风化过程中起主导作用的是无机的因素,而土壤形成过程中则主要是有机的生物因素,它同植物及动物、微生物有机体的生命活动紧密关联。植被对盆地粘土矿物形成和丰度影响体现在4个方面:①植被发育时往往是气候上温度高、降雨量大的时段或地区,同时化学风化盛行,土壤剖面发育深厚,大量生物腐殖质以及形成的有机酸可使土壤变成酸性,有利于蒙脱石、高岭石的形成。②植物残体释放出的二氧化硅、三氧化二铝、三氧化二铁等相互作用可以形成次生粘土矿物(黄瑞农,1987)。③过量有机质的存在,特别是那些能和 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 形成螯合物的有机质的存在,反而会阻碍粘土矿物的形成(黄瑞农,1987)。④植被的发育使得地表粗糙度增加,流水和风对土壤的侵蚀程度减弱,搬运的碎屑减少,土壤中的粘土矿物搬运到盆地中的时间也变长。

2.7 地貌

粘土矿物从风化区到沉积区运移的过程中,气候作用与粘土矿物形成之间的平衡程度、剥蚀和运移的速度、程度影响到盆地中心沉积区粘土矿物的类型和含量。它们受到从风化区到沉积区之间地形的陡缓、距离的远近、地表粗糙度(植被类型和发育程度、土壤类型和厚度、基岩裸露程度)等地貌因素的影响。同时,盆地水系汇集沉积物后的混合程度也极大地影响粘土矿物显示的气候环境变化的信号明晰度。

在相同气候条件下,当地形较陡、风化区与沉积区相距较近、地表粗糙度低(植被发育较少、土厚度较小、或者基岩裸露、坡积碎屑较少、土壤较薄)的情况下,风化碎屑及其中的粘土矿物不至于在搬运过程中受到植被、坡积松散碎屑、土壤层的阻拦,地表径流在搬运风化碎屑的过程中受到的阻碍也就小,风化形成的粘土矿物能够较快地被搬运到盆地中沉积、埋藏,保留了风化区气候环境变化的信息,同时也免于水体介质、气候的变化对风化碎屑中粘土矿物的二次改造。但气候对粘土矿物的形成作用时间较短,剥蚀和搬运作用太快,在此地形情况下形成的粘土矿物可能不多,丰度变化不大,不易识别。反之,地形较缓、风化区与沉积区较远、地表粗糙度大,在此地形情况下气候对粘土矿物作用的时间过长,尽管粘土矿物形成的多,但剥蚀和搬运太慢,受到二次气候变化改造的程度大、混合度大,也可能不易识别。只有粘土矿物与它们的环境条件达到平衡时才

能取得代表性的气候信息,即只有地形相对低缓、风化剥蚀中等的地方,剥蚀的物质才能主要来自于当前的土壤。较低的侵蚀速率才能允许粘土矿物趋于成熟,避免亚地表地层粘土矿物的流失,粘土矿物才具有较好的代表性,如地形平滑、淋滤作用强时,缓坡土壤中多形成高岭石,而低洼处的土壤中蒙脱石为主要的粘土矿物(Kantor and Schwertmann, 1974)。

盆地内水系简单,水系对粘土矿物的混合作用弱,汇集的粘土矿物对区域气候环境的变化具有代表性。粘土矿物在盆地不同级别水系的汇集下经过了剥蚀、搬运和沉积作用,使不同成熟度和类型的土壤发生混合作用,粘土矿物的气候信息相互干扰。如在冲积平原上,在一系列的沉积和改造过程中不同粘土矿物的筛选和它们组合的改变,使得它们的信息变得更加复杂(Singer, 1984)。如在尼罗河流域,地表土壤强烈的混合作用使粘土矿物不可能反映出尼罗河流域清晰的气候环境变化信息(Curtis, 1990)。

2.8 水质

水质指的是粘土矿物形成时水体的pH值、Eh值和盐度等环境特征。粘土矿物在盆地内受这些因素的影响,可形成晶体结构、形态及类型各异的矿物,不同的矿物在一定程度上反映了形成时的条件与环境(鲁春霞,1997)。如在湿热的热带、亚热带,由于岩石强烈分解,淋滤作用强,盐基从土壤和风化壳中大量流失,丰富的腐殖质在土层中移动与 H^+ 、 Al^{3+} 发生代换反应,形成氧化环境(Eh高),土壤成弱酸环境。在酸性溶液中硅析出成凝胶,当pH值较低时, SiO_2 和 Al_2O_3 胶体最易中和而生成高岭石,因而高岭石是弱酸性和淋滤作用、化学风化作用强烈的环境的指示矿物。如果水介质环境为 K^+ 、 OH^+ 比率高的碱性环境,淋滤作用不强,物理风化强烈,易于形成蒙脱石。伊利石也形成于类似蒙脱石的弱碱性环境。在干旱、半干旱地区,降雨量小、蒸发量大,如果盆地排水不畅,岩石受物理风化作用强烈,淋滤作用弱,大量的盐基使水体呈强碱性,有利于纤维状矿物坡缕石和海泡石的形成,它们反映的是气温高且干旱、物理风化较强、排水差的小型内陆盆地环境(Chamley, 1989; 鲁春霞, 1997)。

2.9 成岩作用

在沉积盆地中,注入的粘土矿物代表了物源区及搬运过程中流域内的风化条件(Chamley, 1989)。经风化形成的粘土矿物搬运到盆地中沉积下来以后,与地表常温、常压、生物、水体环境隔离,形成新的封闭

条件,在水体/沉积物界面上不再发生任何反应,保持地表形成时的原始状态,且粘土矿物埋藏后不发生沉积变化,同时,粘土矿物作用于沉积后的热成岩作用不改变初始的粘土矿物组合,才能用于气候环境变化的研究(Yemane *et al.*, 1996; Galán, 2006)。

然而,实际上随着埋藏深度的增加和热力学因素的影响,有时粘土矿物可能会发生转变。粘土矿物在成岩作用过程中随着埋藏深度、温度和压力的增加,演化的总体趋势是从无序结构向有序结构转化,从晶格不完整向晶格完整转化,膨胀晶层多向膨胀晶层少、非膨胀晶层增加转化。在鉴别粘土矿物是否发生成岩转变时应注意以下几点:①温度和压力。粘土矿物的转变一般是从蒙脱石→蒙脱石/伊利石混层矿物→伊利石,实现这一转变的温度为100~140℃,压力约900~920 kg/cm²(刘东生, 1985)。研究点的地温和压力必须测量或者计算出来以确定是否具有成岩转变的条件。②成岩时间。各时代页岩中粘土矿物类型和分布研究表明,蒙皂石及其混层矿物和高岭石的丰度随着年代的变老而减少,而伊利石和绿泥石的丰度则相反(Garrels and McKenzie, 1971);大多数古生代岩石缺失分散状蒙皂石,说明古老页岩中的原生蒙皂石和高岭石早已成岩变成伊利石和绿泥石(赵杏媛等, 1990)。因此,对于时代较老的地层应给予特别的关注。③埋深。蒙脱石在成岩过程中的伊利石化需要至少1500 m的埋深(Chamley, 1989)。高岭石通常来源于表生风化条件并被认为是土壤来源的矿物(Chamley, 1989)。如果粘土矿物组分中伊利石、高岭石、绿泥石共存,表明这些沉积物没有显著的埋藏(曹珂等, 2008; 李祥辉等, 2008)。在通常情况下,规则混层伊利石-蒙脱石存在的大致温度范围在93~137℃之间,相应的镜质体反射率大致为0.51%~1.1%,同时随着埋深的增加和温度的升高,规则混层伊利石-蒙脱石中的伊利石层将逐渐增加(胡作维等, 2008)。伊利石结晶度如果在地层中没有出现从下往上结晶度变小(值变大)的趋势,说明没有受到埋藏变质作用的影响(Kisch, 1983; 于开平等, 2005; 李祥辉等, 2008)。④矿物形态。显微镜下样品没有发生明显的后期变化,部分样品甚至没有明显的压实变形(李祥辉等, 2008)。扫描电镜显示粘土矿物多呈不规则片状,未见次生加大,说明粘土矿物并非自生成因(秦蕴珊, 1987)。

2.10 风

在干旱、半干旱寒区,除了地表暂时性流水能够

搬运风化碎屑中的粘土矿物到盆地沉积外,强大的风力以及由此而引起的尘暴也能够搬运相当多的碎屑物质到盆地和其他地区沉积,如在中亚的干旱、半干旱区(Qiang *et al.*, 2007, 2010; Han *et al.*, 2009)撒哈拉沙漠的粘土矿物经尘暴作用影响可搬运到地中海(Ehrmann *et al.*, 2007)。风搬运的碎屑既有原地风化形成的,也有盆地外来的,那么,其中部分粘土矿物代表的是盆地外的信息,盆地内的粘土矿物的气候环境信息就受到干扰。因此,区分粘土矿物是盆地外风携带的还是盆地流域内流水携带而来的就很重要。然而,如何辨别地层中的外来风尘沉积仍需进一步的研究。

3 结论

在应用粘土矿物进行气候环境分析时,下面几个因素对粘土矿物的形成和丰度起着关键的作用:

(1) 地质构造运动

粘土矿物的气候环境变化研究应用的基本条件是盆地地壳稳定,没有地质构造运动。在此边界条件下,某一时段内某一地区出露的基岩类型、地形地势、植被、水系、地表土壤以及它们的分布等因素也是稳定的,可以把它们看成不变的因素,对于粘土矿物的形成影响相对较小,运用粘土矿物进行古气候解释时的几点主要假设可以得到满足(Yemane *et al.*, 1996; 陈涛等, 2003): ①粘土矿物的形成直接与气候相关。②碎屑源区已知,并且源区在沉积过程中仍保持稳定。③所用粘土矿物是由岩屑形成的,从风化源区到最后的沉积聚集区的搬运过程无变化(埋藏前稳定)。④气候对风化剖面中的粘土矿物作用达到一定时间的平衡,其组合不再发生变化。⑤粘土矿物一经形成、沉积或埋藏后而不发生变化,即沉积后的成岩作用不改变初始的粘土矿物组合(埋藏后稳定)。⑥粘土矿物对环境因素的敏感性是一致的。上述假设条件成立,盆地粘土矿物含量和组合特征主要是受气候因素变化的影响,它们记录的才是气候环境变化的信息,才可以用来分析气候环境变化的历史。

(2) 盆地水系对粘土矿物的混合作用

盆地内水系简单,水系对粘土矿物的混合作用弱,汇集的粘土矿物对区域气候环境的变化越具有代表性。

(3) 盆地规模和区域气候带的关系

盆地规模和区域气候带的关系影响盆地粘土矿物代表的区域气候环境特征。在运用粘土矿物进行气候环境分析时,应说明盆地所处的区域气候背景以及在此背景下盆地的大小和展布方向。

(4) 成岩作用

气候环境变化分析时须注意成岩作用对粘土矿物的影响。

References

- Biscaye P E. 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76 : 803~832.
- Cao Ke, Li Xianghui and Wang Chengshan. 2008. The Cretaceous Clay Minerals and Paleoclimate in Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(01): 115~123 (in Chinese with English abstract).
- Chanley H. 1989. *Clay Sedimentology* [M]. Berlin : Springer-Verlag, 1~560.
- Chen Tao, Wang Huan, Zhang Zuqing, *et al.* 2003. Clay minerals as indicators of paleoclimate [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22 (4): 16~42 (in Chinese with English abstract).
- Chen Tao, Wang Hejin, Zhang Zuqing, *et al.* 2005. An approach to paleoclimate—Reconstruction by clay minerals [J]. *Universitatis Pekinensis (Acta Scientiarum Naturalium)*, 41(2): 309~316 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhong and Yan Wen. 2000. Advances of the studies on clay minerals in marine sediments and its response to evolution of paleoclimate and paleoenvironment [J]. *Marine Sciences*, 24(2): 25~27 (in Chinese with English abstract).
- Curtis C D. 1990. Aspects of climatic influence on the clay mineralogy and geochemistry of soils, paleosols and clastic sedimentary rocks [J]. *J. Geol. Soc. London*, 147 : 351~357.
- Deconinck J F, Amedro F, Baudin F, *et al.* 2005. Late Cretaceous palaeoenvironments expressed by the clay mineralogy of Cenomanian Campanian chalks from the east of the Paris Basin [J]. *Cretaceous Research*, 26 : 171~179.
- Dera G, Pellenard P, Neige P, *et al.* 2009. Emmanuelle Puc at, Jean-Louis Dommergues. Distribution of clay minerals in Early Jurassic Peritethyan seas : Palaeoclimatic significance inferred from multi-proxy comparisons [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 271 : 39~51.
- Devleeschouwer X, Herbosch A and Preat A. 2002. Microfacies, sequence stratigraphy and clay mineralogy of a condensed deep water section around the Frasnian/Famennian boundary (Steinbruch Schmidt, Germany) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 181 : 171~193.
- Dosseto A, Bourdon B, Gaillardet J, *et al.* 2006. Time scale and conditions of weathering under tropical climate : study of the Amazon basin with U-series [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70 : 71~89.
- Egger H, Homayoun M and Schnabel W. 2002. Tectonic and climatic control of Palaeogene sedimentation in the Rhenoanubian Flysch basin (Eastern Alps, Austria) [J]. *Sedimentary Geology*, 152 : 247~262.
- Egli M, Mirabella A and Fitze P. 2001. Clay mineral transformations in soils affected by fluorine and depletion of organic matter within a time span of 24 years [J]. *Geoderma*, 103 : 307~334.
- Ehrmann W, Schmiel G, Hamann Y, *et al.* 2007. Clay minerals in late glacial and Holocene sediments of the northern and southern Aegean Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 249(1~2): 36~57.
- Fagel N, Boski T, Likhoshway L, *et al.* 2003. Late Quaternary clay mineral record in Central Lake Baikal (Academician Ridge, Siberia) [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193 : 159~179.
- Fagel N and Bo es X. 2008. Clay-mineral record in Lake Baikal sediments : The Holocene and Late Glacial transition [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259 : 230~243.
- Fagel N, Debrabant P and Andr L. 1994. Clay supplies in the central Indian basin since the Late Miocene : climatic or tectonic control ? [J]. *Marine Geology*, 122 : 151~172.
- Fagel N and Mackay A W. 2008. Weathering in the Lake Baikal watershed during the Kazantsevo (Eemian) interglacial : Evidence from the lacustrine clay record [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 259 : 244~257.
- Franke D and Ehrmann W. 2010. Neogene clay mineral assemblages in the AND-2A drill core (McMurdo Sound, Antarctica) and their implications for environmental change [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 286 : 55~65.
- Foley N K. 1999. Environmental characteristics of clays and clay mineral deposit [A]. *USGS Information Handout* [C]. 4.
- Gal n E. 2006. Chapter 14 Genesis of clay minerals [A]. Bergaya F, Theng B K G and Lagaly G. *Handbook of Clay Science Developments in Clay Science*, Vol. 1 [C]. Elsevier, 1129~1163.
- Garrels R M and Mackenzie F T. 1971. *Evolution of Sedimentary Rocks* [M]. New York : Norton W W & Co., 397.
- Gingele F X, Deckker P D, Girault A, *et al.* 2002. History of the South Java Current over the past 80 ka [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 183 : 247~260.
- Gingele F X, Deckker P D and Hillenbrand C. 2004. Late Quaternary terrigenous sediments from the Murray Canyons area, offshore South Australia and their implications for sea level change, palaeoclimate and palaeodrainage of the Murray-Darling Basin [J]. *Marine Geology*, 212 : 183~197.
- Gingele F X, De Deckker P D and Norman M. 2007. Late Pleistocene and Holocene climate of SE Australia reconstructed from dust and river loads deposited offshore the River Murray Mouth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 255 : 257~272.
- Gingele F X, De Deckker P D and Hillenbrand C D. 2001. Late Quaternary fluctuations of the Leeuwin Current and palaeoclimates on the adjacent land masses : clay mineral evidence [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(6): 867~874.
- Han Y, Fang X, Zhao T, *et al.* 2009. Suppression of precipitation by dust particles originated in the Tibetan Plateau [J]. *Atmospheric Environment*, 43 : 568~574.
- Hu Zuwei, Huang Sijing, Gao Xiaoyong, *et al.* 2008. Clay minerals in

- the clay beds near the Permian/Triassic boundary at Huaying Mountain, eastern Sichuan, China: their types and origin [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(3): 374 ~ 379(in Chinese with English abstract).
- Huang Ruinong. 1987. *Environmental Pedology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 164 ~ 170(in Chinese).
- Kantor W and Schwertmann U. 1974. Mineralogy and genesis of clays in red black soil toposequences on basic rocks in Kenya [J]. *Journal of Soil Science*, 25: 67 ~ 68.
- Khadkikar A S, Chamyal L S and Ramesh R. 2000. The character and genesis of calcrete in late Quaternary alluvial deposits, Gujarat, western India, and its bearing on the interpretation of ancient climates [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 162(3 ~ 4): 239 ~ 261.
- Kisch H J. 1983. Mineralogy and petrology of burial diagenesis (burial metamorphosis) and incipient metamorphosis in clastic rocks [A]. Larsen G, Chilingar G V. *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks* [C]. Elsevier, 289 ~ 493.
- Lamy F, Hebbeln D, Röhl U, *et al.* 2001. Holocene rainfall variability in southern Chile: a marine record of latitudinal shifts of the Southern Westerlies [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 369 ~ 382.
- Lan Xianhong. 2001. Clay mineral assemblages and their implications to paleoclimates of marine sediments [J]. *Research of Marine Geology*, 17(1): 5 ~ 7(in Chinese with English abstract).
- Li Xianghui, Xu Baoliang, Chen Yunhua, *et al.* 2008. Clay Minerals of the Middle-Late Mesozoic mudrocks from North and Northeast China: Implications to paleoclimate and paleohighland [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 683 ~ 691(in Chinese with English abstract).
- Limkevičius P, Ahlberg A and Grigelis A. 2002. Jurassic smectite and kaolinite trends of the East European Platform: implications for palaeobathymetry and palaeoclimat [J]. *Terra Nova*, 15: 225 ~ 229.
- Liu Baojun. 1979. *Sedimentary Petrology*[M]. Geological Publishing House, 137 ~ 166(in Chinese).
- Liu Dongsheng. 1985. *Losses and Environment*[M]. Beijing: Science Press, 39 ~ 49, 106 ~ 112, 208 ~ 247(in Chinese).
- Liu Z F, Colin C, Trentesaux A, *et al.* 2004. Erosional history of the eastern Tibetan Plateau since 190 kyr ago: clay mineralogical and geochemical investigations from the southwestern South China Sea [J]. *Marine Geology*, 209: 1 ~ 18.
- Liu Z F, Trentesaux A, Clemens S C, *et al.* 2003. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: Implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years [J]. *Marine Geology*, 201(1 ~ 3): 133 ~ 146.
- Long Hao, Wang Chenhua, Liu Yongping, *et al.* 2007. Application of clay minerals in paleoenvironment research [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 22(2): 21 ~ 25(in Chinese with English abstract).
- Lu Chunxia. 1997. Clay minerals as indicators of paleoenvironment [J]. *Journal of Desert Research*, 17(4): 456 ~ 460(in Chinese with English abstract).
- Lu Jinggang. 1997. *Pedological Geology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 11 ~ 18(in Chinese).
- Luo Zhong, Shao Longyi, Yao Guanghua, *et al.* 2008. Mudstones in the Upper Permian coal-bearing series in eastern Yunnan and western Guizhou: Clay minerals composition and the environmental significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 11(13): 297 ~ 304(in Chinese with English abstract).
- Madhavaraju J, Ramasamy S, Ruffell A, *et al.* 2002. Clay mineralogy of the Late Cretaceous and early Tertiary successions of the Cauvery Basin (south eastern India): implications for sediment source and palaeoclimates at the K/T boundary [J]. *Cretaceous Research*, 23: 153 ~ 163.
- Martinelli L, Victoria R L, Dematte J L I, *et al.* 1993. Chemical and mineralogical composition of Amazon River floodplain sediments, Brazil [J]. *Applied Geochemistry*, 8: 391 ~ 402.
- Mees F, Segers S and Van Ranst E. 2007. Palaeoenvironmental significance of the clay mineral composition of Olduvai basin deposits, northern Tanzania [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 47: 39 ~ 48.
- Meunier A. 1980. Les mécanismes de l'altération des granites et le rôle des microsystemes. Etude des arenas du massif granitique de Parthenay (Deux-Sevres) [J]. *Mém. Soc. Geol. Fr.*, 140: 1 ~ 80.
- Oliva P, Viers J and Dupré B. 2003. Chemical weathering in granitic environment [J]. *Chemical Geology*, 202: 225 ~ 256.
- Pai C W, Wang M K and Chiu C Y. 2007. Clay mineralogical characterization of a top sequence of perhumid subalpine forest soils in north-eastern Taiwan [J]. *Geoderma*, 138: 177 ~ 184.
- Pay M D, Astin T R and Parker A. 2000. Clay mineral distribution in the Devonian-Carboniferous sandstones of the Clair Field, west of Shetland, and its significance for reservoir quality [J]. *Clay Minerals*, 35(1): 151 ~ 162.
- Qiang M, Chen F, Wang Z, *et al.* 2010. Aeolian deposits at the south-eastern margin of the Tengger Desert (China): Implications for surface wind strength in the Asian dust source area over the past 20 000 years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 286: 66 ~ 80.
- Qiang M, Chen F, Zhou A, *et al.* 2007. Impacts of wind velocity on sand and dust deposition during dust storm as inferred from a series of observations in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Powder Technology*, 175: 82 ~ 89.
- Qin Yunshan. 1987. *Geology of the East Sea*[M]. Beijing: Science Press, 12 ~ 14(in Chinese).
- Robert C. 2004. Late Quaternary variability of precipitation in Southern California and climatic implications: clay mineral evidence from the Santa Barbara Basin, ODP Site 893 [J]. *Quaternary Science Reviews*, 23(9 ~ 10): 1 029 ~ 1 040.
- Robert C and Kennett J P. 1997. Antarctic continental weathering changes during Eocene-Oligocene cryosphere expansion: Clay mineral and oxygen isotope evidence [J]. *Geology*, 25(7): 587 ~ 590.
- Shi Yuxin, Dai Xuerong, Song Zhiguang, *et al.* 2005. Characteristics of clay mineral assemblages and their spatial distribution of Chinese loess in different climatic zones [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(14): 690 ~ 695(in Chinese with English abstract).
- Singer A. 1979. The paleoclimatic interpretation of clay minerals in soil and weathering-a Review [J]. *Earth Sci. Rev.*, 15: 303 ~ 326.
- Singer A. 1984. The Paleoclimatic Interpretation of Clay Minerals in Sediment-a Review [J]. *Earth Sci. Rev.*, 21: 251 ~ 293.
- Tamburini F, Adatte T, Föllmi K, *et al.* 2003. Investigating the histo-

- ry of East Asian monsoon and climate during the last glacial interglacial period (0-140,000 years): mineralogy and geochemistry of ODP Sites 1143 and 1144 South China Sea [J]. *Marine Geology*, 201 : 147~168.
- Tang Yanjie, Jia Jianye and Xie Xiande. 2002. Environment significance of clay minerals [J]. *Earth Science Frontiers*(China University of Geosciences, Beijing), 9(2): 337~343(in Chinese).
- Tateo F, Sabbadiv R and Morandf N. 2000. Palygorskite and sepiolite occurrence in Pliocene lake deposits along the River Nile : evidence of an arid climat [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 31(3~4): 633~645.
- Thamban M, Rao V P and Schneider R R. 2002. Reconstruction of late Quaternary monsoon oscillations based on clay mineral proxies using sediment cores from the western margin of India [J]. *Marine Geology*, 186 : 527~539.
- Thiry M. 2000. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits : an outlook from the continental origin [J]. *Earth Sci. Rev.*, 49(1~4): 201~221.
- Vanderaveroot P. 2000. Miocene to Pleistocene clay mineral sedimentation on the New Jersey shelf [J]. *Oceanol. Acta*, 23(1): 25~36.
- Velde B. 1992. Introduction to Clay Minerals : Chemistry, Origins, Uses, and Environmental Significance [M]. Chapman & Hall, London ; New York, 88~98.
- Wan Shiming, Li Anchun, Xu Kehui, *et al.* 2008. Characteristics of clay minerals in the Northern South China Sea and its implications for evolution of East Asian Monsoon since Miocend [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(3): 289~300(in Chinese with English abstract).
- West A J, Galy A and Bickle M. 2005. Tectonic and climatic controls on silicate weathering [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 235 : 211~228.
- Winkler A, Wolf-Welling T C W, *et al.* 2002. Clay mineral sedimentation in high northern latitude deep-sea basins since the Middle Miocene (ODP Leg 151, NAAG) [J]. *Int. J. Earth Sci.*, 91(1): 133~148.
- Wu Chengji. 2008. *Physical Geography* [M]. Beijing : Science Press, 250~270(in Chinese).
- Xu Chang. 1990. Clay minerals of salt lakes in China [J]. *Science in China (D)*, (3): 303~312(in Chinese with English abstract).
- Xu Chang. 1993. Advance of clay minerals research in salt lakes of China [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2 : 72~77(in Chinese).
- Yemane K, Kahr G and Kelts K. 1996. Imprints of post-glacial climates and palaeogeography in the detrital clay mineral assemblages of an Upper Permian fluviolacustrine Gondwana deposit from northern Malawi [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 125(1~4): 27~49.
- Yu Kaiping, Han Guangmin, Yang Fengli, *et al.* 2005. Study on Clay minerals of P/T boundary in Meishan Section, Changxin, Zhejiang Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 108~112(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liqiang, Luo Xiaorong, Liu Loujun, *et al.* 2005. Controls on clay mineral distribution in the Cenozoic sediments of the southern Junggar basin, NW China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 40(3): 363~373(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xingyuan and Zhang Youyu. 1990. *Clay Minerals and Their Analysis* [M]. Beijing : Marine Press, 67~70(in Chinese).

附中文参考文献

- 曹珂, 李祥辉, 王成善. 2008. 四川盆地白垩系粘土矿物特征及古气候探讨 [J]. *地质学报*, 82(01): 115~123.
- 陈涛, 王欢, 张祖青, 等. 2003. 粘土矿物对古气候指示作用浅析 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22(4): 16~420.
- 陈涛, 王河锦, 张祖青, 等. 2005. 浅谈利用粘土矿物重建古气候 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(2): 309~316.
- 陈忠, 颜文. 2000. 海洋沉积粘土矿物与古气候、古环境演化响应的研究进展 [J]. *海洋科学*, 24(2): 25~27.
- 胡作维, 黄思静, 邵晓勇, 等. 2008. 川东华蓥山二叠系/三叠系界线附近粘土层中粘土矿物的类型及成因 [J]. *地质通报*, 27(3): 374~379.
- 黄瑞农. 1987. *环境土壤学* [M]. 北京 : 高等教育出版社, 164~170.
- 蓝先洪. 2001. 海洋沉积物中粘土矿物组合特征的古环境意义 [J]. *海洋地质动态*, 17(1): 5~7.
- 李祥辉, 徐宝亮, 陈云华, 等. 2008. 华北-东北南部地区中生代中晚期粘土矿物与古气候 [J]. *地质学报*, 82(5): 683~691.
- 刘宝瑛. 1979. *沉积岩石学* [M]. 地质出版社, 137~166.
- 刘东生. 1985. *黄土与环境* [M]. 北京 : 科学出版社, 39~49, 106~112, 208~247.
- 隆浩, 王晨华, 刘勇平, 等. 2007. 粘土矿物在过去环境变化研究中的应用 [J]. *盐湖研究*, 22(2): 21~25.
- 路景冈. 1997. *土壤地质学* [M]. 北京 : 地质出版社, 11~18.
- 鲁春霞. 1997. 粘土矿物在古环境研究中的指示作用 [J]. *中国沙漠*, 17(4): 456~460.
- 罗忠, 邵龙义, 姚光华, 等. 2008. 滇东黔西上二叠统含煤岩系泥岩粘土矿物组成及环境意义 [J]. *古地理学报*, 110(13): 297~304.
- 秦蕴珊. 1987. *东海地质* [M]. 北京 : 科学出版社, 12~14.
- 师育新, 戴雪荣, 宋之光, 等. 2005. 我国不同气候带黄土中粘土矿物组合特征分析 [J]. *沉积学报*, 23(14): 690~695.
- 汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 粘土矿物的环境意义 [J]. *地学前缘*, 9(2): 337~343.
- 万世明, 李安春, 胥可辉, 等. 2008. 南海北部中新世以来粘土矿物特征及东亚古季风记录 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(3): 289~300.
- 吴成基. 2008. *自然地理学* [M]. 北京 : 科学出版社, 250~270.
- 徐昶. 1990. 我国盐湖粘土矿物及其意义的初步研究 [J]. *中国科学(B)*, (3): 303~312.
- 徐昶. 1993. 我国盐湖粘土矿物研究进展 [J]. *盐湖研究*, 2 : 72~77.
- 于开平, 韩广民, 杨风丽, 等. 2005. 浙江长兴煤山剖面 P/T 界线附近粘土矿物研究 [J]. *沉积学报*, 23(1): 108~112.
- 张立强, 罗晓容, 刘楼军, 等. 2005. 准噶尔盆地南缘新生界粘土矿物分布及影响因素 [J]. *地质科学*, 40(3): 363~375.
- 赵杏媛, 张有瑜. 1990. *粘土矿物和粘土矿物分析* [M]. 北京 : 海洋出版社, 67~70.